

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра Высшей математики и физики

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра электроники твердого тела

Фонд оценочных средств дисциплины

Б1.В.1.03 Адсорбция на поверхности твердого тела

Основная профессиональная образовательная программа
высшего образования по направлению подготовки
(сетевая форма реализации)

03.04.01 Прикладные математика и физика

Направленность (профиль)
«Физические исследования инновационных материалов»

Уровень
Магистратура

Форма обучения
Очная

**Рассмотрено и утверждено на заседании кафедры
08.09.2022 г., протокол № 2
Зав. кафедрой  Зайцева И.В.**

**Автор-разработчик:
д.т.н., Дьяченко Н.В. (РГГМУ),
к.ф.-м.н., Рыбкина А. А. (СПБГУ)**

Санкт-Петербург 2022

1. Паспорт фонда оценочных средств по дисциплине
«Адсорбция на поверхности твердого тела»

Таблица 1. Перечень оценочных средств текущего контроля

№ п/п	Раздел / тема дисциплины	Формируемые компетенции	Наименование средств текущего контроля
1	Адсорбция	ПК-1.1; ПК-2.1	Устная защита выполнения практической работы № 1
2	Электронное состояние адсорбированных атомов	ПК-1.1; ПК-2.1	Устная защита выполнения практической работы № 2
3	Работа выхода при адсорбции. Поверхностная диффузия.	ПК-1.1; ПК-2.1	Устная защита выполнения практической работы № 3
	Текущий контроль успеваемости (ТКУ)	ПК-1.1; ПК-2.1	Тест в Moodle
4	Механизмы роста и структура поверхностных пленок	ПК-1.1; ПК-2.1	Устная защита выполнения практической работы № 4
5	Электрические свойства пленок	ПК-1.1; ПК-2.1	Устная защита выполнения практической работы № 5
Форма промежуточной аттестации:			Зачет

2. Перечень компетенций, с указанием этапов их формирования в процессе освоения дисциплины

Таблица 2. Перечень компетенций, формируемых в процессе освоения дисциплины

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине, характеризующие этапы формирования компетенций	Виды оценочных средств
ПК-1. Способен использовать специализированные знания о выбранных объектах исследований для проведения научных исследований с использованием современных	Знать: – физические процессы, происходящие при взаимодействии частиц с поверхностями твердых тел, атомной и электронной структур адсорбционных систем, поведение адчастиц на поверхности (десорбция, поверхностная диффузия и т.п.), изучение механизмов формирования пленок, зависимостей физико-химических свойств от толщины пленок;	Задания практико-ориентированного уровня: Устный опрос. Выполнение практической работы №1

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине, характеризующие этапы формирования компетенций	Виды оценочных средств
информационных технологий ПК-1.1. Применяет специальные знания для исследования структуры и свойств новых	Уметь: – самостоятельно анализировать экспериментальные результаты, получаемые при его участии в курсе спец. лаборатории;	Задания практико-ориентированного уровня: Устный опрос. Выполнение практической работы №2
	Владеть: – навыками применения полученные знания в различных областях физики и химии твердого тела, материаловедения.	Задания практико-ориентированного уровня: Устный опрос. Выполнение практической работы №3
ПК-2. Способен осваивать классические и современные методы исследования веществ ПК-2.1. Выбирает оптимальные методы и технические средства, готовит оборудование, работает на экспериментальных физических установках	Знать: – о методах и средствах планирования и организации эксперимента с применением современных технических средств; – методы анализа и обработки информации;	Задания практико-ориентированного уровня: Устный опрос.
	Уметь: – организовывать работу по проведению экспериментальных исследований; – применять современные математические программные пакеты для автоматической обработки результатов эксперимента	Задания практико-ориентированного уровня: Устный опрос. Выполнение практической работы №4
	Владеть: – навыками работы на экспериментальных физических установках; – навыками проведения физического эксперимента и обработки данных;	Задания практико-ориентированного уровня: Устный опрос. Выполнение практической работы №5

3. Балльно-рейтинговая система оценивания

Таблица 3. Распределение баллов по видам учебной работы

Вид учебной работы, за которую ставятся баллы	Баллы
Текущий контроль успеваемости	0-100
Промежуточная аттестация	0-30
ИТОГО	0-100

Таблица 3.1. Распределение баллов по текущему контролю

№	Вид работ	Min	Max
1. Обязательная часть			
1.1 Текущий контроль успеваемости по проверке форсированности остаточных знаний Текущий контроль успеваемости. Тест:			
	0	10	
1.2 Выполнение практических работ:			
1.2.1	Практическая работа №1. Экспериментально исследовать процесс адсорбции уксусной кислоты из водного раствора на активированном угле, построить изотерму адсорбции и аппроксимировать её уравнениями Ленгмюра и Фрейндлиха	4	6
1.2.2	Практическая работа №2. Изучить изменение электронного состояния атомов углерода и кислорена при адсорбцииmonoоксида углерода на поверхности меди методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и теоретического моделирования.	4	6
1.2.3	Практическая работа №3. Экспериментально изучить влияние адсорбции цезия на работу выхода поверхности вольфрама и определить параметры поверхностной диффузии адсорбированных атомов	4	6
1.2.4	Практическая работа №4. Экспериментально исследовать кинетику роста оксидной пленки на меди в зависимости от температуры окисления, построить кинетические кривые, определить константы скорости окисления и проанализировать морфологию полученных покрытий для установления преобладающего механизма их роста.	4	6
1.2.5	Практическая работа №5. Экспериментально исследовать влияние толщины оксидной пленки на меди на ее диэлектрические характеристики, построить вольтамперные характеристики и определить зависимость электрической прочности от толщины диэлектрического слоя.	4	6
Итого баллов по обязательной части		20	40
2. Вариативная часть			
2.1	Реферат по дисциплине «Адсорбция на поверхности твердого тела»	1	5
2.2	Участие в НИРС	10	25
2.3	Участник клуба МиФ	1	10
2.4	Участие в олимпиаде (физика, математика)	5	10
2.4.1	участие	5	5
2.4.2	призер	10	10
2.5	Публикация в индексируемом журнале (совместно с преподавателем)	10	10
2.6	Акселерационная программа/ проект Росмолодежи	20	40
2.6.1	участие	20	20
2.6.2	грант	40	40
	Промежуточная аттестация по дисциплине	0	30

Итого баллов по вариативной части	40	60
Итого баллов по дисциплине		100

Таблица 3.2. Конвертация баллов в итоговую оценку

Оценка	Баллы
Зачтено	40-100
Не зачтено	0-39

4. Содержание оценочных средств текущего контроля. Критерии оценивания

Перечень учебно-методического и информационного обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине, в том числе по подготовке к текущему контролю и промежуточной аттестации представлены в рабочих программах и методических рекомендациях для обучающихся по освоению дисциплины.

4.1. Вопросы для устного опроса

Перечень вопросов для устного опроса и критерии оценивания по темам дисциплины:

Таблица 4. Вопросы для устного опроса

№	Раздел/тема	Вопрос
1	Адсорбция	1) Кинетика адсорбции. Теория Ленгмюра. Изотерма Ленгмюра. 2) Полимолекулярная адсорбция, теория БЭТ. Физическая и химическая адсорбция. Силы, приводящие к физической адсорбции: ориентационные, поляризационные, дисперсионные, репульсивные. Потенциал Леннарда-Джонса. Модель попарных взаимодействий и ее критика. Химическая связь: метод молекулярных орбиталей, теория валентных связей. Заселенность перекрывания, локальная плотность состояний.
2	Электронное состояние адсорбированных атомов	Электронное состояние адатома. Модель Герни. Теория Ньюнса, роль корреляционной энергии. Пространственное распределение электронной плотности. Энергия связи адатомов с поверхностью. Особенности химической связи на поверхности. Полуэмпирический метод оценки энергии адсорбции, метод Хигучи. Электроотрицательность. Латеральное взаимодействие адатомов. Прямое и косвенное взаимодействие. Структура адсорбированных слоев. Фазовая диаграмма. Согласованные и несогласованные решетки.
3	Работа выхода при адсорбции. Поверхностная диффузия.	Изменение работы выхода при адсорбции. Дипольная модель, модель Лэнга. Поверхностная

№	Раздел/тема	Вопрос
		диффузия. Уравнения Фика. Константы поверхностной диффузии. Анизотропия. Зависимость от концентрации, механизмы поверхностной диффузии: ловушечный, механизм “разворачивающегося ковра”, солитонный. Компенсационный закон.
4	Механизмы роста и структура поверхностных пленок	Механизмы роста пленок. Послойный рост (механизм Франка-ван-дер-Мерве), островковый (механизм Фольмера-Вебера), механизм Странски-Крастановой. Эпитаксия. Ориентационные соотношения Нишиямы-Вассермана и Курдюмова-Сакса .Зародыши и их образование. Влияние условий роста на размеры кристаллитов
5	Электрические свойства пленок	Электропроводность диспергированных пленок. Механизмы: термоэлектронная эмиссия, туннелирование, активированное туннелирование, туннелирование через подложку. Электропроводность тонких сплошных пленок. Уравнение Больцмана, приближение времени релаксации. Диффузное и зеркальное отражение электронов от поверхности, параметр Фукса.

Практические работы

Практическая работа 1

Цель работы: экспериментально исследовать процесс адсорбции уксусной кислоты из водного раствора на активированном угле, построить изотерму адсорбции и аппроксимировать её уравнениями Ленгмюра и Фрейндлиха.

Физико-химические основы процесса

Адсорбция — это процесс самопроизвольного концентрирования вещества из объёмной фазы на поверхности раздела фаз. В данной работе изучается адсорбция из раствора, где адсорбтив (уксусная кислота) переходит из жидкой фазы на поверхность твёрдого адсорбента (активированного угля).

Основные характеристики процесса:

- Адсорбционная способность (Γ): Количество вещества, адсорбированного на единице массы адсорбента
- Изотерма адсорбции: Зависимость величины адсорбции от равновесной концентрации при постоянной температуре

Модели адсорбции:

1. Модель Ленгмюра: предполагает мономолекулярную адсорбцию на однородной поверхности
Уравнение: $\Gamma = (\Gamma_m * K * C) / (1 + K * C)$
2. Модель Фрейндлиха: Эмпирическое уравнение для неоднородных поверхностей
Уравнение: $\Gamma = K * C^{(1/n)}$

Экспериментальная методика и оборудование

Методика основана на измерении изменения концентрации раствора после

установления адсорбционного равновесия. Используемое оборудование: термостат, аналитические весы, колбы конические, пипетки, бюретки, фильтры. Основные реагенты: активированный уголь, уксусная кислота, раствор NaOH, фенолфталеин.

Ход работы

Подготовка к эксперименту

- 1.1. Приготовление исходных растворов уксусной кислоты различных концентраций (0.1–1.0 M)
- 1.2. Подготовка адсорбента: взвешивание навесок активированного угля (по 0.5 г)
- 1.3. Установка термостата на постоянную температуру (25°C)

Проведение адсорбционного эксперимента

- 2.1. В серию конических колб вносят по 50 мл растворов уксусной кислоты разной концентрации
- 2.2. В каждую колбу добавляют навеску активированного угля
- 2.3. Колбы герметично закрывают и помещают в термостат на 60 минут при постоянном перемешивании
- 2.4. После установления равновесия растворы фильтруют для отделения угля

Анализ равновесных концентраций

- 3.1. Отбирают аликовты фильтрата (10 мл)
- 3.2. Проводят титрование раствором NaOH (0.1 M) с фенолфталеином
- 3.3. Рассчитывают равновесные концентрации уксусной кислоты в каждом растворе

Обработка экспериментальных данных

- 4.1. Рассчитывают величину адсорбции для каждого опыта:
$$\Gamma = (C_0 - C) * V / m$$
- 4.2. Строят изотерму адсорбции в координатах $\Gamma = f(C)$
- 4.3. Проводят линеаризацию данных в координатах уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха
- 4.4. Определяют константы уравнений адсорбции

Оформление отчета

Отчет по практической работе должен содержать:

1. Титульный лист
2. Цель работы
3. Теоретическая часть: Механизмы адсорбции, модели Ленгмюра и Фрейндлиха
4. Экспериментальная часть:
 - Схема эксперимента
 - Методика анализа
5. Результаты и расчеты:
 - Таблица экспериментальных данных
 - График изотермы адсорбции
 - Линеаризованные графики для уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха
 - Расчет констант адсорбционных моделей
6. Выводы:
 - Анализ формы изотермы адсорбции
 - Оценка адекватности моделей Ленгмюра и Фрейндлиха
 - Определение максимальной адсорбционной ёмкости

Практическая работа 2

Цель работы: изучить изменение электронного состояния атомов углерода и кислорена при адсорбции монооксида углерода на поверхности меди методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и теоретического моделирования.

Теоретические и методические основания

Физико-химические основы процесса

При адсорбции атомов и молекул на поверхности происходит перераспределение

электронной плотности, что приводит к изменению электронного состояния как адсорбата, так и substrate. Основные эффекты:

1. Химические сдвиги в XPS спектрах:
 - Изменение энергии связи core-level электронов
 - Образование новых химических связей
 - Перераспределение заряда
2. Основные параметры электронного состояния:
 - Энергия связи (Binding Energy)
 - Работа выхода
 - Плотность состояний (DOS)
3. Методы исследования:
 - Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS/XPS)
 - Сканирующая тунNELьная спектроскопия (STS)
 - Теоретическое моделирование (DFT)

Экспериментальная методика и оборудование

Методика основана на сравнительном анализе XPS спектров чистой поверхности и поверхности с адсорбатом. Используемое оборудование: рентгеновский фотоэлектронный спектрометр с источником Al K α (1486.6 эВ), камера сверхвысокого вакуума (10^{-10} мбар), система очистки поверхности, система дозирования газов.

Ход работы

Подготовка поверхности и проведение адсорбции

1.1. Подготовка поверхности меди:

- Механическая полировка
- Электрохимическое травление
- Отжиг в UHV при 500°C
- Ионное травление Ar $^+$

1.2. Контроль чистоты поверхности:

- Регистрация обзорного XPS спектра
- Проверка отсутствия примесей O 1s, C 1s

1.3. Проведение адсорбции:

- Дозирование CO на поверхность Cu при 100 K
- Контроль экспозиции (1-10 L)

Регистрация и анализ XPS спектров

2.1. Регистрация спектров:

- Обзорный спектр (0-1000 эВ)
- Высокоразрешенные спектры C 1s и O 1s
- Спектры Cu 2p и Cu 3p

2.2. Обработка спектров:

- Вычитание фона (Shirley или Tougaard)
- Калибровка по пику Au 4f $_{7/2}$ (84.0 эВ)
- Разложение на компоненты

Теоретическое моделирование

3.1. Построение модельных систем:

- Поверхность Cu(100)
- Молекула CO в различных позициях адсорбции

3.2. Расчет электронной структуры:

- Плотность состояний (DOS)
- Распределение заряда
- Работа выхода

Анализ результатов

4.1. Определение химических сдвигов

4.2. Идентификация видов адсорбции

4.3. Корреляция экспериментальных и расчетных данных

Оформление отчета

Отчет по практической работе должен содержать:

1. Титульный лист
2. Цель работы
3. Теоретическая часть: Принципы XPS, электронная структура адсорбированных молекул
4. Экспериментальная часть: Методика подготовки поверхности и проведения измерений
5. Результаты и расчеты:
 - XPS спектры до и после адсорбции
 - Таблица химических сдвигов
 - Результаты теоретического моделирования
 - Сравнительный анализ различных позиций адсорбции
6. Выводы:
 - Влияние адсорбции на электронное состояние поверхности
 - Идентификация механизма адсорбции CO на Cu
 - Оценка степени переноса заряда

Практическая работа 3

Цель работы: экспериментально изучить влияние адсорбции цезия на работу выхода поверхности вольфрама и определить параметры поверхностной диффузии адсорбированных атомов.

Физико-химические основы процесса

Работа выхода (Φ) - минимальная энергия, необходимая для удаления электрона из твердого тела в вакуум. При адсорбции атомов с низким потенциалом ионизации (например, щелочных металлов) происходит:

1. Изменение работы выхода:
 - Образование поверхностного дипольного момента
 - Уменьшение работы выхода в начальной стадии адсорбции
 - Эффект Оствальда - зависимость Φ от покрытия
2. Поверхностная диффузия:
 - Перескоковая миграция адсорбированных атомов
 - Зависимость коэффициента диффузии от температуры: $D = D_0 \exp(-E_a/kT)$
 - Роль энергии активации поверхностной диффузии (E_a)

Методы исследования:

- Измерение работы выхода: метод термоэлектронной эмиссии, метод Кельвина
- Исследование поверхностной диффузии: метод затухания рельефа, полевая эмиссионная microscopy

Экспериментальная методика и оборудование

Методика основана на одновременном измерении работы выхода и наблюдении процессов поверхностной диффузии. Используемое оборудование: установка сверхвысокого вакуума (10^{-10} мбар), вольфрамовая нить накала, источник цезия, измеритель работы выхода, масс-спектрометр, система подогрева образца.

Ход работы

Подготовка экспериментальной установки

1.1. Подготовка поверхности вольфрама:

- Отжиг при 2300К в течение 10 часов
- Очистка от примесей кислорода и углерода
- Формирование атомарно-чистой поверхности

1.2. Калибровка оборудования:

- Калибровка источника цезия
 - Проверка вакуума
 - Калибровка измерителя работы выхода
- Измерение работы выхода при адсорбции

2.1. Измерение начальной работы выхода чистого вольфрама:

- Методом термоэлектронной эмиссии
- Методом Кельвина для контроля

2.2. Проведение адсорбции цезия:

- Дозированная подача цезия на поверхность
- Регистрация изменения работы выхода
- Построение кривой $\Phi = f(\theta)$

Исследование поверхностной диффузии

3.1. Создание градиента концентрации:

- Локальное осаждение цезия
- Нагрев до температур 300-500К

3.2. Измерение параметров диффузии:

- Визуализация распространения цезия
- Измерение коэффициента диффузии
- Определение энергии активации

Комбинированный анализ

4.1. Корреляция изменения работы выхода и диффузии

4.2. Построение модели адсорбционного слоя

4.3. Определение дипольного момента адсорбированных атомов

Оформление отчета

Отчет по практической работе должен содержать:

1. Титульный лист
2. Цель работы
3. Теоретическая часть: Физика работы выхода, механизмы поверхностной диффузии
4. Экспериментальная часть: Схема установки, методика измерений
5. Результаты и расчеты:
 - Кривая зависимости работы выхода от покрытия
 - Кинетические кривые поверхностной диффузии
 - Определение параметров диффузии
 - Расчет дипольного момента
6. Выводы:
 - Количественная оценка изменения работы выхода
 - Определение механизма поверхностной диффузии
 - Практическая значимость результатов

Практическая работа 4

Цель работы: экспериментально исследовать кинетику роста оксидной пленки на меди в зависимости от температуры окисления, построить кинетические кривые, определить константы скорости окисления и проанализировать морфологию полученных покрытий для установления преобладающего механизма их роста.

Физико-химические основы процесса

Рост поверхностных оксидных пленок представляет собой классический пример гетерогенного процесса, протекающего на границе раздела фаз «металл-газ». Данный процесс является диффузионно-контролируемым и описывается параболическим законом роста, что свидетельствует о том, что скорость процесса лимитируется диффузией ионов через непрерывно утолщающийся слой оксида.

Основные характеристики процесса:

- Толщина оксидной пленки (δ): Ключевой параметр, характеризующий степень окисления.
- Константа скорости параболического окисления (k_p): определяет скорость роста пленки при данной температуре.
- Энергия активации процесса окисления (E_a): характеризует температурную зависимость скорости процесса.

Модели роста пленок:

1. Параболический закон Вагнера: описывает рост плотной, сплошной оксидной пленки, скорость которого контролируется встречной диффузией ионов металла и анионов кислорода через слой оксида. Уравнение: $\delta^2 = k_p \cdot t$, где δ — толщина пленки, k_p — константа параболического окисления, t — время.
2. Анализ механизма: Преобладающая диффузия катионов металла наружу приводит к росту оксида на внешней поверхности пленки, в то время как диффузия анионов кислорода внутрь приводит к росту оксида на внутренней границе раздела с металлом. Анализ морфологии пленки позволяет идентифицировать механизм.

Экспериментальная методика и оборудование

Методика основана на измерении прироста массы медных образцов в процессе изотермического окисления на воздухе. Используемое оборудование: муфельная печь с точным терморегулятором, аналитические весы, секундомер, шлифовальная бумага, обезжирающие растворы. Основные реактивы: пластины из технически чистой меди (M1).

Ход работы

Подготовка к эксперименту

Медные пластины тщательно обрабатываются шлифовальной бумагой для удаления предварительно образовавшихся оксидов и загрязнений, после чего обезжираются в ацетоне и высушиваются. Подготовленные образцы взвешиваются на аналитических весах, и их начальная масса фиксируется. Муфельную печь устанавливают на заданную температуру в диапазоне 300–500 °C.

Проведение окислительного эксперимента

Размещают подготовленные медные образцы в предварительно прогретой муфельной печи. Включение секундомера производят в момент помещения образцов в печь.

Эксперимент проводят в изотермическом режиме при нескольких фиксированных температурах. Для каждой температуры используют новый образец. Через заданные промежутки времени образец извлекают из печи, охлаждают в эксикаторе и взвешивают для определения прироста массы. После взвешивания образец возвращают в печь для продолжения окисления.

Анализ полученных покрытий

После завершения кинетических измерений и финального взвешивания проводят визуальный и микроскопический анализ поверхности образцов, окисленных при разных температурах. Отмечают цвет, однородность и наличие дефектов на поверхности оксидных пленок.

Обработка экспериментальных данных

На основании данных о приросте массы (Δm) и площади поверхности образца (S) рассчитывают условную толщину оксидной пленки (δ), предполагая, что она состоит преимущественно из Cu_2O . Ставят графики зависимости толщины пленки от времени ($\delta = f(t)$) и квадрата толщины пленки от времени ($\delta^2 = f(t)$) для каждой температуры окисления. По наклону линейных участков графиков $\delta^2 = f(t)$ определяют константы параболического окисления (k_p) для каждой температуры. Ставят график зависимости $\ln(k_p)$ от обратной температуры ($1/T$) в координатах уравнения Аррениуса и рассчитывают эффективную энергию активации процесса окисления.

Оформление отчета

Отчет по практической работе должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Теоретическая часть: механизмы роста поверхностных пленок, параболическая модель роста.
4. Экспериментальная часть: описание методики и условий проведения эксперимента.
5. Результаты и расчеты:
 - о Таблица экспериментальных данных (время, масса, прирост массы, толщина пленки).
 - о Графики кинетических кривых в координатах $\delta - t$ и $\delta^2 - t$.
 - о Таблица рассчитанных констант скорости параболического окисления (k_p).
 - о График в координатах Аррениуса ($\ln k_p$ от $1/T$) и расчет энергии активации.
 - о Описание морфологии полученных оксидных пленок.
6. Выводы:
 - о Анализ кинетики процесса (соответствие параболическому закону).
 - о Обсуждение влияния температуры на скорость окисления.
 - о Интерпретация значения энергии активации и обсуждение преобладающего механизма роста пленки на основе анализа морфологии.

Практическая работа 5

Цель работы: экспериментально исследовать влияние толщины оксидной пленки на меди на ее диэлектрические характеристики, построить вольтамперные характеристики и определить зависимость электрической прочности от толщины диэлектрического слоя.

Физико-химические основы процесса

Поверхностные оксидные пленки на металлах обладают диэлектрическими свойствами, что обусловлено их электронной структурой и наличием запрещенной зоны. При наложении электрического поля через диэлектрик протекают различные виды токов, характер которых зависит от приложенного напряжения и свойств пленки.

Основные характеристики диэлектрических пленок:

- Удельное объемное сопротивление (ρ): характеризует способность пленки сопротивляться прохождению электрического тока
- Электрическая прочность (E_{pr}): Напряженность электрического поля, при которой происходит пробой диэлектрика
- Тангенс угла диэлектрических потерь ($\tan \delta$): характеризует потери энергии в диэлектрике

Механизмы электропроводности в диэлектриках:

1. Омическая проводимость: Обусловлена движением носителей заряда под действием электрического поля
2. Пробой диэлектрика: наступает при достижении критической напряженности поля и может быть:
 - о Тепловым (вследствие перегрева)
 - о Электрическим (ударная ионизация)
 - о Электромеханическим (механическое разрушение)

Экспериментальная методика и оборудование

Методика основана на измерении токов утечки через оксидные пленки различной толщины при постепенном увеличении приложенного напряжения. Используемое оборудование: источник высокого напряжения (0–1000 В), микроамперметр, вольтметр, термостат, металлические электроды. Образцы: медные пластины с термически выращенными оксидными пленками толщиной 0.1–2.0 мкм.

Ход работы

Подготовка образцов и измерительной установки

Медные пластины очищают механически и химически, после чего подвергают термическому окислению при различных температурах (200–400°C) и времени выдержки (10–120 минут) для получения пленок различной толщины. Толщину оксидного слоя контролируют интерферометрическим методом. На подготовленные образцы напыляют верхний электрод из алюминия диаметром 10 мм. Собирают измерительную схему, обеспечивающую плавное регулирование напряжения и измерение тока через образец.

Измерение вольтамперных характеристик

Образец помещают в термостат, установленный на температуру 25°C. Плавно повышают напряжение на образце от 0 до значения, соответствующего пробою диэлектрика, с шагом 10 В. На каждом шаге фиксируют значение тока через образец. Измерения проводят для образцов с различной толщиной оксидной пленки. Для каждого образца строят график зависимости тока от приложенного напряжения.

Определение электрической прочности

По полученным вольтамперным характеристикам определяют напряжение пробоя для каждого образца. Рассчитывают электрическую прочность как отношение напряжения пробоя к толщине диэлектрической пленки. Строят график зависимости электрической прочности от толщины оксидного слоя.

Исследование температурной зависимости

Для одного из образцов проводят измерения вольтамперных характеристик при различных температурах (25–100°C). Строят семейство ВАХ и определяют температурный коэффициент сопротивления оксидной пленки.

Обработка экспериментальных данных

На основании полученных экспериментальных данных рассчитывают удельное объемное сопротивление оксидных пленок при различных напряжениях. Страйт графики зависимости удельного сопротивления от напряженности электрического поля. Анализируют форму вольтамперных характеристик и идентифицируют механизмы электропроводности в исследованных пленках. Определяют зависимость электрической прочности от толщины диэлектрического слоя.

Оформление отчета

Отчет по практической работе должен содержать:

1. Титульный лист
2. Цель работы
3. Теоретическая часть: механизмы электропроводности в диэлектриках, виды пробоя
4. Экспериментальная часть: схема установки, параметры образцов
5. Результаты и расчеты:
 - Таблица экспериментальных данных (толщина пленки, напряжение пробоя, токи утечки)
 - Вольтамперные характеристики для пленок различной толщины
 - График зависимости электрической прочности от толщины оксидного слоя
 - Расчет удельного объемного сопротивления
6. Выводы:
 - Анализ механизмов электропроводности в оксидных пленках
 - Обсуждение зависимости электрической прочности от толщины диэлектрика
 - Оценка пригодности полученных пленок для практического применения

Таблица 4.1. Критерии оценивания практических заданий

Критерий	Результат
Задания выполнены в полном объеме. Предоставлен письменный ответ. Выявлены знания компетентности в рамках задания.	6 баллов
Задания выполнены частично. Предоставлен письменный ответ.	4 балла

Выявлены частичные знания компетентности в рамках задания.	
Задания не выполнены. Не представлен письменный ответ. Знания компетентности в рамках задания не выявлены.	0 баллов

Таблица 4.2. Критерии оценивания устного опроса

Критерий	Балл
Обучающийся не смог дать ответ на вопросы преподавателя	0
Обучающийся неполно ответил на вопрос преподавателя, допустил значительные ошибки при ответе и при выполнении заданий; обучающийся	1
Обучающийся ответил на поставленный вопрос преподавателя, допустив незначительные ошибки в ответах или выполнил задание в целом правильно, допустив неточности и незначительные ошибки	3
Обучающийся без ошибок полно и правильно ответил на поставленный вопрос преподавателя	5

Таблица 4.3. Критерии оценивания заданий из вариативной части

№	Вид работ	Min	Max
2.1	Реферат по дисциплине «Адсорбция на поверхности твердого тела»	1	5
2.2	Участие в НИРС	10	25
2.3	Участник клуба МиФ	1	10
2.4	Участие в олимпиаде (физика, математика)	5	10
2.4.1	участие	5	5
2.4.2	призер	10	10
2.5	Публикация в индексируемом журнале (совместно с преподавателем)	10	10
2.6	Акселерационная программа/ проект Росмолодежи	20	40
2.6.1	участие	20	20
2.6.2	грант	40	40
	Промежуточная аттестация по дисциплине	0	30
Итого баллов по вариативной части		40	60
Итого баллов по дисциплине			100

Образцы тестовых заданий текущего контроля
ПК-1.1; ПК-2.1

1. Что такое адсорбация?
 - а) Процесс растворения вещества в жидкости
 - б) Процесс накопления вещества на поверхности твердого тела
 - в) Процесс диффузии газа через мембрану
 - г) Процесс испарения жидкости

2. Какой тип адсорбации характеризуется слабыми ван-дер-ваальсовыми силами?
 - а) Хемосорбция
 - б) Физическая адсорбция

- в) Ионная адсорбация
г) Электрохимическая адсорбация
3. Изотерма Ленгмюра описывает адсорбацию на:
а) Гомогенной поверхности с мономолекулярным слоем
б) Гетерогенной поверхности с полимолекулярным слоем
в) Только при высоких температурах
г) Только для газов
4. Какая изотерма адсорбации применяется для определения удельной поверхности по методу BET?
а) Изотерма Фрейндлиха
б) Изотерма Ленгмюра
в) Изотерма Брунауэра-Эммета-Теллера
г) Изотерма Генри
5. Что такое десорбция?
а) Увеличение адсорбции с ростом температуры
б) Освобождение адсорбированного вещества от поверхности
в) Процесс абсорбации в объеме тела
г) Образование новых связей на поверхности
6. В каком случае адсорбация является экзотермическим процессом для физической адсорбции?
а) Всегда эндотермическим
б) Обычно экзотермическим
в) Только при низких давлениях
г) Только для хемосорбции
7. Какой метод используется для измерения кинетики адсорбации?
а) Спектроскопия
б) Вolumетрия
в) Хроматография
г) Калориметрия
8. Что характеризует константу Ленгмюра (K) в уравнении изотермы?
а) Скорость адсорбации
б) Энергию связи адсорбата с поверхностью
в) Максимальную адсорбционную емкость
г) Температуру процесса
9. При каком условии адсорбация переходит в хемосорбцию?
а) При низкой температуре
б) При образовании химических связей
в) При высоком давлении
г) При наличии растворителя
10. Какое уравнение описывает кинетику адсорбации по Ленгмюру?
а) $d\theta/dt = k_a C (1 - \theta) - k_d \theta$
б) $\theta = K C / (1 + K C)$
в) $\ln(1 - \theta) = -k t$
г) $Q = Q_m K P / (1 + K P)$

11. Что такое точка БЭТ в адсорбционной изотерме?
- Максимальная адсорбция
 - Точка, где начинается мультислойная адсорбация
 - Минимальная энергия активации
 - Переход от физической к химической адсорбации
12. Какое приложение адсорбции используется в катализе?
- Адсорбция газов на поверхности катализатора для ускорения реакции
 - Очистка воды от примесей
 - Разделение смесей в хроматографии
 - Все вышеперечисленное
13. Что влияет на адсорбционную емкость поверхности?
- Только температура
 - Только давление
 - Площадь поверхности, природа адсорбента и адсорбата
 - Только концентрация адсорбата
14. Какой тип адсорбации наблюдается в ионно-обменных смолах?
- Физическая
 - Хемосорбция
 - Ионная адсорбция
 - Капиллярная конденсация
15. Что такое изостерическая теплота адсорбции?
- Теплота, выделяемая при десорбции
 - Теплота адсорбации при постоянном покрытии поверхности
 - Теплота, зависящая от давления
 - Теплота фазового перехода

Таблица 4.4. Критерии оценивания тестирования

Критерий	Баллы
Зачтено, более 40 % или равно 40% ответов правильных	10
Не зачтено, менее 40 % ответов правильных	0
Итого	0-10

Примерная тематика рефератов

- Основные типы адсорбации: физическая и химическая адсорбация – сравнительный анализ механизмов и условий протекания.
- Изотермы адсорбции: теория Ленгмюра и ее применение в описании мономолекулярной адсорбации.
- Изотерма Фрейндлиха: особенности эмпирического описания адсорбации на гетерогенных поверхностях.
- Теория БЭТ (Брунауэра-Эммета-Теллера): моделирование полимолекулярной адсорбации и расчет удельной поверхности.
- Кинетика адсорбции: модели и экспериментальные методы изучения скорости процессов.
- Термодинамика адсорбции: энталпия, энтропия и изостерическая теплота адсорбции.

7. Адсорбенты и их классификация: свойства и применение углеродных материалов, цеолитов и оксидов.
8. Адсорбация газов на твердых поверхностях: влияние температуры, давления и природы адсорбента.
9. Ионная адсорбация и ионно-обменные процессы: механизмы и применение в водоочистке.
10. Адсорбация в катализе: роль поверхности твердого тела в ускорении химических реакций.
11. Экспериментальные методы измерения адсорбации: волюметрия, гравиметрия и спектроскопия.
12. Адсорбация в экологии: применение для очистки воздуха и воды от загрязнителей.
13. Наночастицы как адсорбенты: современные тенденции и перспективы в нанотехнологиях.
14. Адсорбация в биологических системах: взаимодействие молекул с поверхностями клеток и тканей.
15. Современные вызовы в адсорбции: влияние климатических изменений и разработка новых материалов.

Таблица 4.5 Критерии оценивания реферата

Критерий оценивания	Результат
Содержание реферата соответствует заявленной в названии тематике; реферат оформлен в соответствии с общими требованиями написания и техническими требованиями оформления реферата; реферат имеет чёткую композицию и структуру; в тексте реферата отсутствуют логические нарушения в представлении материала; корректно оформлены и в полном объёме представлены список использованной литературы и ссылки на использованную литературу в тексте реферата; реферат представляет собой самостоятельное исследование, представлен качественный анализ найденного материала, отсутствуют факты plagiarismа.	5 баллов
Содержание реферата соответствует заявленной в названии тематике; реферат оформлен в соответствии с общими требованиями написания реферата, но есть погрешности в техническом оформлении; реферат имеет чёткую композицию и структуру; в тексте реферата отсутствуют логические нарушения в представлении материала; в полном объеме представлены список использованной литературы, но есть ошибки в оформлении; реферат представляет собой самостоятельное исследование, представлен качественный анализ найденного материала, отсутствуют факты plagiarismа.	4 балла
Содержание реферата соответствует заявленной в названии тематике; в целом реферат оформлен в соответствии с общими требованиями написания реферата, но есть погрешности в техническом оформлении; в целом реферат имеет чёткую композицию и структуру, но в тексте реферата есть логические нарушения в представлении материала; в полном объеме представлен список использованной литературы, но есть ошибки в оформлении; некорректно оформлены или не в полном объеме представлены ссылки на использованную литературу в тексте реферата; в целом реферат представляет собой самостоятельное исследование, представлен анализ найденного материала, отсутствуют факты plagiarismа.	3 балла

<p>Содержание реферата соответствует заявленной в названии тематике; в реферате отмечены нарушения общих требований написания реферата; есть погрешности в техническом оформлении; в целом реферат имеет чёткую композицию и структуру, но в тексте реферата есть логические нарушения в представлении материала; в полном объёме представлен список использованной литературы, но есть ошибки в оформлении; некорректно оформлены или не в полном объёме представлены ссылки на использованную литературу в тексте реферата; в целом реферат представляет собой достаточно самостоятельное исследование, представлен анализ найденного материала, присутствуют единичные случаи фактов плагиата.</p>	2 балла
---	---------

5. Содержание оценочных средств промежуточной аттестации. Критерии оценивания

Форма промежуточной аттестации по дисциплине – зачет.

Форма проведения зачета: устный ответ на два вопроса в билете.

Перечень вопросов и критерии оценивания ответов на вопросы в билете по темам дисциплины.

Перечень вопросов для подготовки к зачету:

Компетенции: ПК-1.

1. Зародыши и их образование.
2. Химическая связь. Метод молекулярных орбиталей.
3. Механизмы роста пленок.
4. Химическая связь. Метод валентных связей.
5. Изменение работы выхода при адсорбции.
6. Кинетика адсорбции. Теория Ленгмюра.
7. Электронное состояние адатома.

Компетенции: ПК-2.

8. Полимолекулярная адсорбция. Теория БЭТ.
9. Структура адсорбированных слоев.
10. Эпитаксия.
11. Поверхностная диффузия одиночных атомов.
12. Латеральное взаимодействие адатомов
13. Электропроводность тонких сплошных пленок
14. Энергия связи адатомов с поверхностью.
15. Химическая поверхностная диффузия.

Таблица 5. Критерии оценивания промежуточной аттестации в форме зачета

Критерий оценивания	Баллы
Обучающийся ответил на два вопроса в билете. Продемонстрировал знания по формируемым компетенциям в полном объеме (приводились доводы и объяснения). Знания освоения компетенций выявлены.	30 баллов
Обучающийся ответил на один вопрос в билете. Продемонстрировал знания по формируемым компетенциям частично. Постиг смысл изучаемого материала (может высказать вербально, четко и ясно, или конструировать новый смысл, новую позицию). Знания освоения компетенций выявлены частично.	15 баллов
Обучающийся не ответил на вопросы в билете.	0

Не может согласовать свою позицию или действия относительно обсуждаемой тематики. Знания освоения компетенций не выявлены.	
--	--